

**“Anomalías y procesos de largo plazo de las aguas  
del Golfo de México y el Mar Caribe”**

**Jefe de proyecto:** Dr. Marcelino Hernández González.

**Autores:** Joan Navarro Padrón, Liliam Arriaza Oliveros, Sergio Luis Lorenzo Sánchez, Claudia Bolívar Rodríguez, Pedro Manuel González Jardines, Damián León Guevara, Luis Sorinas Morales, Javier González Domínguez, Daimy Avila Rodríguez, Grethel García Bubucogen, Lázaro Miguel Soto Calaña, Martha María Rivero Fernández, Darlene Ferreiro Álvarez, Inaivis Santos Carrillo, Amílcar E. Calzada Estrada, Dagne Boudet Rouco, Yunisleydi Rodríguez Días, Miguel Ángel Hernández Martínez, Nilo Hernández Orosco, Dailin Reyes Perdomo, Orlando Marzo Lobaina, Yudit Ríos Ortega, Yanuary Garrido Lindsay.

## **Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”**

Resumen: el presente proyecto tuvo como objetivo general analizar y predecir las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar en Cuba en relación con la variabilidad estérica, la circulación y la conexión con los principales eventos de la variabilidad del clima. En este sentido se avanzó en el conocimiento predictivo de las anomalías del nivel del mar, que son de magnitud comparable a los cambios del nivel medio del mar previstos para el transcurso del presente siglo: se caracterizan las anomalías mensuales (componente aleatoria de la variabilidad mensual del nivel del mar) en Cuba, en el contexto de los procesos oceánicos y atmosféricos con los que se encuentran relacionados, en el Mediterráneo Americano; la variabilidad de la presión atmosférica a nivel del mar y de las anomalías mensuales del nivel del mar son coherentes para periodos correspondientes de la variabilidad mensual e interanual en presencia del ENOS en Cuba; la variabilidad mensual del IOS es coherente con la variabilidad mensual del nivel del mar, en Siboney, La Habana, Cuba, para la banda de frecuencias de 0.18 cpm; el procedimiento para la simulación y pronóstico de las anomalías de la variabilidad mensual del nivel del mar es viable y puede perfeccionarse añadiendo la velocidad promedio mensual de las corrientes marinas como un tercer predictor, tomando en consideración la información sintetizada por este proyecto. Los resultados de esta necesaria investigación de carácter básico o fundamental, que contó con los avales del Centro del Clima del Instituto de Meteorología y del Estado Mayor nacional de la Defensa Civil (se anexan), brindara salidas de gran importancia para el proceso de elaboración de las comunicaciones nacionales de Cambio Climático y para las bases científicas de los estudios de riesgo. Este proyecto reúne a un grupo de investigadores y especialistas de los institutos de Oceanología (Oceanografía y Geomática marina y Meteorología (Meteorología marina, centro de Pronósticos y Centro del Clima) y de la Red Mareo gráfica Nacional (Geocuba Geodesia).

## Introducción.

Las características del clima no son iguales en las diferentes zonas del planeta, están determinadas por una combinación compleja de influencias astronómicas, meteorológicas y geográficas, conocidas como factores climáticos. El clima de la Tierra, no está asociado exclusivamente con lo que sucede en la atmósfera, los procesos atmosféricos también están relacionados con la superficie terrestre, los océanos, la criósfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo a escala continental) y la biosfera (flora y fauna terrestre y marina), todos los cuales integran el sistema climático (Planos E., R. Rivero y V. Guevara, 2013).

El clima es dinámico y ese dinamismo se manifiesta por su variabilidad. En las últimas décadas se han producido anomalías climáticas extremas en muchas regiones del planeta; que han acarreado grandes afectaciones humanas y materiales en no pocos países, en algunos casos han provocado desastres de inmensas proporciones. Por lo tanto, la variabilidad climática ha sido motivo de una mayor atención internacional, la que aumenta ante la posibilidad de que ella también cambie, si el clima cambia (Planos E., R. Rivero y V. Guevara, 2013).

Las aguas de los océanos se encuentran en continuo movimiento. La fuente de energía responsable de ello proviene primeramente del Sol. En efecto, tanto la circulación atmosférica como oceánica son manejadas por la radiación solar (calentamiento), y debido al estrecho contacto entre estos medios, ambas se encuentran íntimamente unidas. La energía solar genera diferencias de temperatura sobre la superficie terrestre y da origen a los vientos en la atmósfera. Estos, a su vez, son la causa principal del movimiento de las aguas superficiales del océano. Además, el calentamiento desigual del océano por la energía solar contribuye al movimiento de las masas de agua en forma de corrientes (Planos E., R. Rivero y V. Guevara, 2013).

El sistema Tierra-Atmósfera-Océano puede ser considerado como una gran máquina termodinámica que toma su energía del Sol, la convierte en otras formas de energía y luego la devuelve al espacio exterior.

La energía solar es absorbida principalmente en las regiones de latitudes bajas (trópicos y subtropicos). Esta energía es transmitida como energía térmica o calor latente, en forma de vapor de agua, desde los trópicos hacia las regiones polares. Eventualmente, esta energía es irradiada de nuevo al espacio exterior en una cantidad igual a la que entró, dejando el sistema Tierra-Atmósfera-Océano en equilibrio termodinámico.

Debido a la absorción diferencial entre las zonas tropicales y polares se produce un flujo neto de energía entre la atmósfera y el océano. El agua oceánica se calienta en las regiones tropicales y se mueve hacia las regiones polares por medio de las corrientes como la Corriente del Golfo que fluye hacia el nordeste junto a la costa oriental de Estados Unidos. Esta transporta grandes cantidades de calor desde bajas latitudes hacia altas latitudes. Si no fuera por la Corriente del Golfo, la Península Escandinava sería 10 °C más fría de lo que es ahora. En la atmósfera, la energía también se mueve hacia el polo por medio del ciclo de la circulación global. Una forma de llevar esta energía de bajas a altas latitudes es a través

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

del calor latente mediante el transporte de vapor de agua. Este vapor se condensa y cede la misma cantidad de energía que fue usada para su evaporación en los trópicos. Como las regiones polares ceden más energía hacia el espacio que aquella que reciben del Sol, logran compensar esta pérdida por medio del transporte de energía desde latitudes bajas hacia las altas.

Se conoce que en general, y a escala global, dichas anomalías se relacionan con diversos factores, oceanográficos, climáticos y meteorológicos. Como resultado de la influencia de los procesos antes mencionados, los cambios estacionales del nivel del mar, se caracterizan por presentar como promedio, máximos en septiembre y octubre y mínimos entre enero y marzo en Cuba (Hernández – González y Marzo, 2009) y anomalías con fuertes desviaciones del ciclo anual medio, principalmente en presencia del ENOS (Hernández – González y Díaz – Llanes, 2001a y Hernández – González, 2015).

El ENOS es considerado actualmente como la señal dominante del clima global para escalas de tiempo que oscilan desde meses hasta algunos años (Enfield, 1987; Galindo y Centeno, 1989). El Niño es la componente oceánica de ENOS y se manifiesta a través de los cambios en las anomalías de la TSM en regiones del Pacífico Tropical (Trenberth, 1991). Mientras que la Oscilación del Sur es tomada generalmente por la comunidad científica internacional como la señal que identifica el estado del fevento en la región del Pacífico y proviene de las diferencias de presiones a nivel del mar entre las estaciones meteorológicas de Darwin y Tahití (Climate Analysis Center, 1993; BMA, 1992).

El ENOS despliega una decena de patrones teleconectivos a través de las oscilaciones de la corriente en chorro subtropical, la que durante el invierno del hemisferio norte se intensifica de manera atípica, para acentuar situaciones meteorológicas extremas en distintas regiones del mundo.

Los cambios estacionales y las anomalías del nivel medio del mar se encuentran relacionados con los efectos de la variabilidad estacional y las anomalías de la presión atmosférica (Blázquez, 1989; Hernández – González y Marzo, 2009), cuya influencia en la escala sinóptica en aguas cubanas fue determinada mediante métodos espectrales en Hernández – González (2015).

En los espectros de la variabilidad inter – anual sobresalen principalmente, los componentes que obedecen a cambios en los parámetros de la interacción océano-atmósfera y a los efectos de la reestructuración de los procesos del sistema océano-atmósfera, con períodos de dos a siete años (Guerman y Levikov, 1988). A éstos corresponden, por la periodicidad de su ocurrencia, los eventos de la variabilidad del clima como el ENOS, los cuales dan lugar a un forzamiento de baja frecuencia del nivel medio del mar identificable mediante el análisis de las series de valores medios mensuales de nivel del mar (Chelton y Enfield, 1986). Se ha comprobado la ocurrencia en Cuba de dichas anomalías anuales (Hernández – González, 2015).

Como se ha comprobado, las anomalías mensuales y anuales del nivel medio del mar determinan un mayor impacto sobre las zonas costeras en el contexto del ascenso del nivel medio del mar a largo plazo (Hernández – González, *et al.*, 2014).

## *Antecedentes.*

De los principales trabajos publicados internacionalmente acerca de las anomalías del nivel medio mensual y anual se destacan Wyrski (1977), Enfield y Allen (1980 y 1983), Chelton y Enfield (1986) y Sweet y Gill (2009). Los primeros trabajos se dedican principalmente a las anomalías que han ocurrido en las costas del océano Pacífico, relacionadas con el ENOS y el último caracteriza las fuertes anomalías ocurridas en la costa Este de los Estados Unidos en el 2009 que produjeron inundaciones costeras.

Los primeros trabajos en Cuba, relacionados con las anomalías el nivel del mar y sus causas, se publicaron por Blázquez (1989), Hernández - González y Díaz - Llanes (2001 a y b) y los más recientes por Hernández - González y Marzo (2009) y Hernández - González (en prensa). En estos trabajos se determinaron algunas de las principales causas de la ocurrencia de las anomalías mensuales y anuales del nivel medio del mar, asociadas a los periodos de ocurrencia del ENOS, y se caracterizaron estadísticamente. Se determinó que algunas de las anomalías no han ocurrido en presencia del ENOS, sin llegar a esclarecer las causas que las provocan. Aunque se analiza la influencia de la variabilidad de la presión atmosférica y la frecuencia y características de los eventos sinópticos, como factores generadores de las anomalías mensuales y anuales, no se aborda la influencia de las anomalías de la circulación, el viento y la variabilidad del campo termo – halino.

Existe una amplia literatura sobre el fenómeno ENOS, contemplando aspectos teóricos (Cane *et al.*, 1986), observacionales (Rasmusson, 1991) y de pronóstico (Zebiak y Cane, 1987). También existen trabajos sobre la influencia que ejerce el fenómeno sobre la economía de diversos países (Nicholls, 1986), y específicamente sobre las capturas de especies marinas de interés comercial a nivel mundial.

## *Objetivo general.*

Analizar y predecir las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar en Cuba en relación con la variabilidad estérica, la circulación y la conexión con los principales eventos de la variabilidad del clima.

## *Objetivos específicos.*

1. Caracterizar la variabilidad mensual y anual del nivel del mar, la circulación y el campo termo – halino del Mar Caribe y del Golfo de México.
2. Caracterizar la variabilidad mensual y anual del nivel del mar, la circulación y el campo termo – halino del océano Atlántico norte.
3. Determinar la conexión entre las anomalías del nivel del mar en Cuba, y la variabilidad de la circulación y del campo termo – halino. Diseñar método de pronóstico.
4. Determinar la conexión de las anomalías del nivel del mar con los principales índices climáticos. Diseñar método de pronóstico.

## Capítulo I. Materiales y métodos.

### 1.1. La zona de estudio.

#### *Límites geográficos.*

La zona de estudio, el mar Caribe y el golfo de México, conforman el llamado Mediterráneo Americano como también se le conoce, se encuentra delimitada por el arco de las Antillas menores y mayores y los límites continentales de América del Norte, Central y del Sur. Como una segunda zona de estudio, se añadirá el océano Atlántico norte, comprendido entre los 0° y 60° de latitud Norte y los límites continentales e insulares de América, Europa y África.

La región mayor del Atlántico norte, y el Mediterráneo Americano, se encuentran estrechamente relacionados por sus medios oceánicos y atmosféricos, en aspectos tales como masas de agua, mareas, sistemas de vientos predominantes y eventos sinópticos, advección de calor, humedad y sal por las corrientes marinas y la interacción océano – atmósfera, corrientes fluviales de grandes ríos, y otros. Adicionalmente, el área comparablemente menor de la cuenca del Mediterráneo Americano, recibe una particular influencia de marcado carácter continental y estacional, principalmente en el Golfo de México.

La máxima autoridad internacional en materia de delimitación de mares, la Organización Hidrográfica Internacional («International Hydrographic Organization, IHO»), considera el mar Caribe como un mar independiente. En su publicación de referencia mundial, «Limits of oceans and seas» (*Límites de océanos y mares*, 3ª edición de 1953), le asigna el número de identificación 27 y lo define de la forma siguiente:

En el canal de Yucatán el mismo límite que el descrito para el golfo de México [una línea que une el faro de cabo Catoche (21°37'N, 87°04'W) con el faro a luz del cabo de San Antonio en Cuba]. En el norte. En el paso de los Vientos, una línea que une punta Caleta (74°15'W) y punta Perla (19°40'N) en Haití. En el canal de la Mona, una línea que une cabo Engaño y el extremo de Agujereada (18°31'N, 67°08'O), en Puerto Rico.

Límites orientales. Desde la punta de San Diego (Puerto Rico) hacia el norte a lo largo del mismo meridiano (65°39'O) a la línea 100 brazas, y desde allí hacia el este y hacia el sur, de tal manera que todas las islas, bancos de arena y aguas someras de la Antillas Menores estén incluidas en el mar Caribe hasta la punta Galera (extremo noreste de la isla de Trinidad). Desde la punta Galera a través de Trinidad a punta Galeota (extremo sureste) y de allí a punta Baja (9° 2'N, 61° 0'W) en Venezuela.

La máxima autoridad internacional en materia de delimitación de mares, el «International Hydrographic Organization» (IHO), define en su publicación de referencia mundial, «Limits of oceans and seas» (*Límites de océanos y mares*) (3ª edición de 1953), el golfo de México (que tiene el número de identificación 26) de la forma siguiente:

## **Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”**

En el Sureste, una línea que une el faro de cabo Catoche (21°37'N, 87°04'O) con el faro del cabo de San Antonio en Cuba, a través de esta isla hasta el meridiano 83°O y hacia el norte a lo largo de este meridiano hasta la latitud de la punta Sur de Tortugas Secas (24°35'N), a lo largo de dicho paralelo en dirección este hasta Rebecca Shoal (82°35'W) y desde allí a través de los bancos y los Cayos de Florida al continente al final oriental de la bahía de la Florida, todas las aguas del estrecho de Tortugas Secas y el continente se consideran dentro del Golfo.

### *Clima y eventos del estado del tiempo.*

El clima del Caribe está influido por las corrientes oceánicas del Golfo y de Humboldt. La ubicación tropical del mar ayuda a que el agua se mantenga a una temperatura alta moderada, en un rango entre 21,0 y 32,2 °C durante el año.

El Caribe es el lugar de origen de algunos huracanes del hemisferio occidental. La temporada de huracanes del Caribe se presenta entre los meses de junio a diciembre, y con mayor fuerza entre agosto y septiembre. En promedio anualmente se producen cerca de 9 tormentas tropicales y 5 alcanzan la intensidad de huracán. De acuerdo con el Centro Nacional de Huracanes en el Caribe ocurrieron 385 huracanes entre 1494 y 1900. Las corrientes de aire que se desarrollan en la costa oeste de África hacen el recorrido a través del océano Atlántico, algunas de estas se convierten en tormentas tropicales e incluso pueden convertirse en huracanes del Atlántico, especialmente en áreas de baja presión del Caribe oriental.

### *1.2. Los datos primarios y la información.*

#### *1.2.1. Datos de las series horarias de nivel del mar de la Red Mareográfica Nacional.*

Tabla 1.1. Datos de la Red Mareográfica Nacional.

	<i>National Tide Gauge Network</i>	<i>Desde</i>	<i>Hasta</i>	<i>Latitud (N)</i>	<i>Longitud (W)</i>
1	<i>Los Morros de Piedra</i>	1971	2015	21°54, 0´	84°54, 4´
2	<i>Mariel Boca</i>	2000	2015	23° 01, 2´	82° 45, 4´
3	<i>Siboney</i>	1966	2015	23°05, 6´	82°28, 2´
4	<i>Havana Bay</i>	1999	2015	23°08, 9´	82°21, 2´
5	<i>La Isabela</i>	1972	2015	22°56, 4´	80°00, 8´
6	<i>Nuevitas Bufaderos</i>	1992	2015	21°33, 6´	77°14, 2´
7	<i>Nuevitas Punta de Prácticos</i>	1992	2015	21°36, 2´	77°05, 9´
8	<i>Puerto Padre</i>	2001	2015	21° 12, 1´	76° 36, 0´
9	<i>Gibara</i>	1971	2015	21°06, 5´	76°07, 5´
10	<i>Santiago de Cuba</i>	1992	2015	19°59, 1´	75°52, 5´
11	<i>Cabo Cruz</i>	1992	2015	19°50, 4´	77°43, 7´
12	<i>Manzanillo</i>	1992	2015	20°20, 4´	77°08, 8´
13	<i>Santa Cruz del Sur</i>	2014	2015	20°42, 0´	77°58, 6´
14	<i>Casilda</i>	1972	2015	21°45, 2´	79°59, 5´
15	<i>Cayo Loco</i>	1992	2015	22°09, 1´	80°27, 3´
16	<i>La Coloma</i>	1990	2015	22°14, 2´	83°34, 3´

Los datos mareo gráficos utilizados son procesados primariamente tomando en cuenta las normas cubanas establecidas (Geocuba Geodesia, 2004) y los manuales y guías de la COI (IOC, 1985 y 2006).

### 1.2.2. Datos meteorológicos espacio – temporales.

Se usaron mapas de la pág. Web NCEP/NCAR, que se exhiben más arriba, en reanálisis a 1000 milibares y viento meridional en metros por segundos, así se repite mapa de viento zonal, considerando los periodos de lluvia y en los mapas de superficie la presión



## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

atmosférica en una data desde 1981 al 2010, para un total aproximado de 30 años. Las variables que se analizan son la presión atmosférica al nivel del mar, la temperatura del aire y las componentes zonal y meridional del viento, obtenidas a partir medios mensuales de superficie del período enero 1970 – diciembre 2013, disponibles en el sitio <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>, donde se puede acceder a los datos de reanálisis de NCEP/NCAR.

1.2.3. Datos e información meteorológica y oceanográfica disponible en internet:

<http://www.insmet.cu>

<http://www.nhc.noaa.gov/>

<http://www.srh.weather.gov/>

<http://www.aoml.noaa.gov/hrd>

[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO\\_summary.pdf](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/MJO_summary.pdf)

[http://meted.ucar.edu/hurricane/chp\\_spa/hp.htm](http://meted.ucar.edu/hurricane/chp_spa/hp.htm)

[http://www.imn.ac.cr/educa/JC-HURACAN\\_HURACANjc.htm](http://www.imn.ac.cr/educa/JC-HURACAN_HURACANjc.htm)

<http://www.thesloshcomputermodel.htm>

<http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/List/>

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/timeseries/timeseries1.pl>

[http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_NOAA\\_NWS\\_CPC\\_SOI.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_NOAA_NWS_CPC_SOI.html)

### 1.3. Los métodos.

#### 1.3.1. Herramienta GrADS.

En la obtención de los mapas de la variable temperatura superficial del mar (TSM) se utilizó el programa GrADS (Grid Analysis and Display System) en su versión 2.0.0. Este software es empleado en numerosos servicios meteorológicos y oceanográficos por la cantidad de formatos de datos que admite, sus potencialidades, rendimiento y la disponibilidad en diversos sistemas operativos.

#### 1.3.2. Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los sistemas de información geográfica (SIG) son sistemas computarizados que permiten, manipular información geográfica georeferenciada. Según Rhind (1989), es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, el manejo, la manipulación, el análisis, el modelado y el despliegue de datos espacialmente referenciados (georeferenciados) para la solución de los complejos problemas del manejo y planeamiento territorial. La mayor aplicación de este sistema está íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real (mapas) a partir de las bases de datos digitales.

#### 1.3.3. Altimetría y batimetría.

Implementación Geomática de los resultados obtenidos mediante el sistema (WGS84) (EPSG: 4236), GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) y SRTM v. 4th. <http://www.cigar.gov>. Sistema de Información Geográfica: Mapinfo 10.5 Discover 12.

### 1.3.4. Modelación de las corrientes marinas mediante SISCOM.

El "SISistema de cálculo de las COrrientes Marinas para Cuba" (SISCOM) se desarrolló a partir del POM. Las nuevas formulaciones matemáticas, implementadas en códigos computacionales de Fortran 7, permiten reproducir la influencia conjunta de las características físico-geográficas de la plataforma insular cubana y de la marea en la circulación marina de las aguas someras del archipiélago insular cubano.

Modelo físico-matemático: Los algoritmos implementados en FORTRAN 77 del POM se basan en las ecuaciones generales que rigen la dinámica del océano, que son las mismas para cualquier área geográfica (<http://www.aos.princeton.edu.WWWPUBLIC/htdocs.pom>).

Las condiciones iniciales y las condiciones de fronteras dependen del problema concreto a resolver. En las aguas oceánicas que rodean a Cuba la imposición de estas condiciones es similar a las tomadas por Ezer y Mellor (1994) al simular la dinámica del Mar Caribe, Golfo de México y Atlántico Norte.

Dado que las zonas marinas someras de Cuba son generalmente homogéneas en la vertical (Lluis, 1972 y Emilsson y Tápanes, 1971) las variables de salida del POM están referidas a las componentes horizontales de la velocidad de la corriente, las cuales son promediadas

de fondo a superficie en tres niveles  $\sigma$ . Además, teniendo en cuenta que, según lo expuesto por Emilsson y Tápanes (1971), los principales agentes que afectan el movimiento de las aguas marinas someras cubanas son la marea, las corrientes en el mar abierto adyacente y el viento, se incluyó el cálculo de la superficie libre del mar para considerar el efecto de la primera. Para la solución del problema planteado se necesitan condiciones iniciales y de frontera para: las componentes de la velocidad ( $U$ ,  $V$ ), la temperatura ( $T$ ), la salinidad ( $S$ ) y la superficie libre ( $\eta$ ). Los valores iniciales para cada una de estas variables pueden ser tomados acorde a promedios históricos, al cálculo dinámico o nulas (Bowden, 1983; Oey y Lee, 2003 y Jiménez, 2004).

Además, se necesitan, condiciones de frontera lateral abiertas para todas las variables a estimar. La selección de estas condiciones es el problema más complejo a resolver para ajustar un modelo numérico (Mellor y Yamada, 1996). Dichas condiciones implican introducir

al modelo valores conocidos de las variables:  $U$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $S$  y  $\eta$  o de sus derivadas o una combinación de ambas en las fronteras laterales abiertas del área.

Los códigos del POM incluyen algunas posibles condiciones en las fronteras laterales abiertas; pero, ninguna corresponde a la necesaria para reproducir la influencia de la marea desde el océano adyacente hacia las aguas someras cubanas. En ellas, el intercambio con las aguas oceánicas adyacentes es determinado en escala temporal de horas por la evolución de las ondas de mareas y la principal restricción a éstas es la variación brusca de

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

la profundidad. Para esta situación se crea, teórica y numéricamente, la condición que reproduce el intercambio, agregando al modelo una nueva formulación, que resuelve la componente de marea en la frontera oceánica.

Entonces, la solución de la ecuación 1, en derivadas parciales de la superficie libre con respecto al tiempo y a la componente tangencial a la dirección transversal a la periferia oceánica del cuerpo de agua reproduce la evolución de estas ondas en la frontera oceánica.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial y} = f(y,t) \quad (1)$$

Donde  $c = \sqrt{g \cdot H}$  es la velocidad de ondas externas;  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad; H es la profundidad máxima en la frontera del cuerpo de agua;  $f(y,t)$  es una función que describe la marea en la zona.

La solución general de esta ecuación es:

$$\eta(y,t) = C(y) \text{sen}(ky) \cos(\sigma t)$$

En particular, para una onda de marea:

$$C(y) = \eta_I = \eta_a \left( \frac{H_i}{H_a} \right)^{\frac{3}{4}} \quad \text{donde}$$

$\eta_I$  - amplitud de la marea en el interior del cuerpo de agua;  $\eta_a$  - amplitud de la marea en la frontera abierta del cuerpo de agua;  $H_i$  - Profundidad en el interior del cuerpo de agua;

$H_a$  – profundidad en la frontera abierta del cuerpo de agua;  $k = 2\pi/\lambda$  y  $\lambda$  - longitud de la onda;  $\sigma = 2\pi/T$  y T - Período de la onda.

Combinaciones lineales de esta solución, donde  $\lambda$  y T correspondan en cada función a las longitudes y períodos, respectivamente de los diferentes tipos de ondas, permiten considerar la influencia de la marea en las fronteras laterales abiertas.

Para el cálculo de la variable  $\eta$  en puntos pertenecientes a fronteras abiertas, del dominio de aplicación del SISCUM, en las aguas someras cubanas se añadieron nuevos códigos computacionales a los originales del POM (<http://www.aos.princeton.edu.WWWPUBLIC/htdocs.pom>).

Post-procesadores: al resolver la dinámica del área de estudio, en el SISCUM, estiman las variaciones espacio-temporales de las corrientes marinas y de la superficie del mar. El SISCUM además calcula la energía cinética turbulenta, la macro escala de turbulencia, la densidad de agua. Si este último, se emplea en modo pronóstico, también calcula las variaciones de la temperatura y la salinidad en la escala espacio-temporal predeterminada.

## **Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”**

Se diseñaron, pos-procesadores que permiten obtener representaciones numéricas y gráficas, en cualquier escala espacio-temporal, de las corrientes marinas y otras variables estimadas. Toda la información generada por la ejecución de los sistemas de cálculo es pos-procesada para su empleo durante el análisis de los resultados y para la alimentación de nuevas modelaciones.

Las corrientes marinas y la variación de la superficie del mar siempre son convertidas a formato gráfico durante el pos-procesamiento, el que brinda una visión de la distribución espacial y una secuencia temporal del comportamiento de estas variables.

Empleando la herramienta DECOM, creada sobre MATLAB 7.0, los resultados del cálculo científico realizado con el SISCOSON son pos-procesados. DECOM lee el archivo Out\_COM, generado por el SISCOSON, y conformado por una larga cadena de caracteres con toda la información de partida y final de su aplicación. Luego esta herramienta, transforma los caracteres a una matriz para cada variable calculada, almacenándolas directamente en archivos numéricos con el comando SAVE del MATLAB 7.0. DECOM, también, se encarga de la creación de gráficas y archivos de formato **\*\*\*.avi** para obtener sucesión de secuencias temporales de la distribución espacial de cada variable.

Los archivos finales de datos creados por cada pos-procesador quedan listos para ser empleados en la retroalimentación del SISCOSON indistintamente.

Características de la información de salida: el objetivo fundamental de la aplicación de los sistemas de cálculo es obtener estimaciones de las corrientes marinas en una determinada escala espacio-temporal. No obstante, el análisis de la circulación marina incluye otras variables pos-procesadas, como la variación de la superficie del mar, que también constituye información de salida. Las estimaciones de las variables físico-geográficas presentan la misma naturaleza que sus mediciones, en cuanto a unidades y estadísticas generales. A diferencia, su distribución horizontal cubre toda la zona de aplicación con el detalle permitido por la rejilla numérica de cálculo y su distribución temporal permite el análisis de situaciones pasadas, presentes y/o futuras. Todas las variables estimadas que componen la información de salida se da en unidades del sistema MKS. Las estimaciones finales, a diferencia de cualquier medición, están representadas como los valores, en cada punto de la rejilla numérica empleada, de cada variable escalar o de las componentes de un vector en dos o tres dimensiones. Los archivos finales de datos contienen matrices de elementos, los cuales corresponden al valor, en cada posición geográfica e instante de tiempo, de cada una de las variables escalares y de las componentes de los vectores. Esta es una representación global y la vez detallada de la dinámica de la zona de estudio. La información de salida, contiene también gráficas de la distribución espacial y temporal de cada variable. Las corrientes marinas calculadas con el SISCOSON en modo diagnóstico, también, pueden ser tomadas como representativas de la circulación media de cualquier zona en un tiempo promedio que corresponde al ajuste del diagnóstico y a la representatividad temporal de la información de partida. El resultado del modo diagnóstico es la información de partida para un pronóstico, si se alimenta el SISCOSON, además, con viento y marea en línea, permite obtener pronósticos de la circulación en cualquier escala temporal. En caso de situaciones consideradas de régimen extremo las corrientes marinas obtenidas del diagnóstico

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

realizado con el SISCOM constituyen la información de partida, como condición inicial para ejecutar el pronóstico, que además parte de considerar los forzamientos representativos de la situación extrema.

Los valores de las variables de entrada al modelo: temperatura, salinidad, viento, anomalía geopotencial y velocidad geostrofica, son interpolados horizontalmente a cada rejilla numérica con 361x130, 325x81 y 704x356 nodos para cada área, respectivamente.

En cuanto a la vertical se trabaja con 18 niveles sigma ( $\sigma$ ). Inicialmente, se realizan varias corridas del modelo con diferente tiempo total de ejecución. Se presentan los resultados correspondientes a diagnósticos y pronósticos diarios tridimensionales, con pasos de tiempo DTE = 1.5 segundos. Entre 5 y 15 días se obtiene el máximo de la energía cinética turbulenta de los procesos involucrados en el movimiento de las aguas, lo cual significa el ajuste correcto de las soluciones diagnósticas.

### 1.3.5. Análisis espectral.

La caracterización de las anomalías mensuales del nivel del mar, se realizó mediante la estadística y el análisis espectral aplicados a los procesos aleatorios estacionarios (Bendat y Piersol, 1986; Guerman y Levikov, 1988, Hernández – González, 2015).

Se calcularon los momentos puros y mixtos de primer orden, el valor medio  $\bar{X}$  y la función de auto - correlación  $\hat{R}_r$  de todas las series anuales y de las series semi-anuales correspondientes al período del año junio – noviembre, que comprende la temporada ciclónica, y al período diciembre – mayo, durante el cual ocurren con mayor frecuencia los sistemas frontales.

$\hat{R}_r$  caracteriza la relación lineal del valor de un proceso físico en un momento dado del tiempo con su valor en otro momento. El gráfico de  $\hat{R}_r$  de un proceso armónico, como la marea, se repite cíclicamente y el de un proceso aleatorio, como las variaciones aperiódicas del nivel del mar, tiende a cero.

También se calcularon los momentos puros mixtos de segundo orden, la varianza  $\sigma^2$  la función espectral  $\hat{G}_k$ . Con la finalidad de suavizar la función de correlación se utilizó la ventana de Parzen.

En Física, la frecuencia y la amplitud de las variaciones determinan la intensidad de un proceso, la cual puede estimarse elementalmente mediante la varianza. Como  $\hat{G}_k$  se expresa en el dominio de las frecuencias, caracteriza la estructura espectral, la distribución de energía o la variabilidad medio cuadrática de la muestra para la banda de frecuencias analizada. O sea, caracteriza la distribución por frecuencias de la intensidad de las

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

variaciones. La integral del espectro energético tiene un valor finito que es proporcional al área comprendida entre el gráfico de la función espectral y los ejes de coordenadas, por lo que caracteriza también la intensidad promedio del proceso analizado.

Los gráficos de  $\hat{G}_k$  se elaboraron con una escala logarítmica, ya que su transformación logarítmica posee una distribución más cercana a la normal que su distribución original. En los procesos estacionarios  $\hat{G}_k$  se relaciona con  $\hat{R}_r$  a través de la Transformada de Fourier.

Se calcularon además las funciones de coherencia, de coherencia múltiple y parcial que determinan el nivel de la relación lineal entre dos variables para valores específicos de frecuencia. La función de coherencia da la medida de la relación lineal, sin tomar en consideración la influencia de otros procesos en la entrada; mientras que la función de coherencia parcial da una medida de la relación lineal entre los procesos de entrada y el de salida, cuando los primeros son correlacionables. La función de coherencia múltiple muestra el nivel de respuesta lineal del proceso de salida a los procesos de entrada.

### 1.3.6. Caracterización de las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar.

Con el propósito de caracterizar la variabilidad de las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar, se calcularon las series de valores medios diarios (VMD), mediante la aplicación del filtro de Doodson X0 a las series de alturas horarias de nivel del mar de 10 años o más de duración (IOC, 2006). Tomando en consideración que los momentos puros de primer y segundo orden de los procesos físicos representan la componente estática y dinámica de los mismos (Bendat y Piersol, 1986), se obtuvieron las series de valores medios mensuales (VMM) y de la varianza mensual (VM), a partir de las series de VMD. A continuación, se calcularon las series de las anomalías del valor medio mensual (AVMM), mediante la sustracción del ciclo anual medio del nivel del mar (CAM) (Enfield y Allen, 1980 y 1983). A partir de las AVMM, se calcularon las series de anomalías del valor medio anual (AVMA) y a partir de los VMD se calcularon las series de la varianza anual (VA). La variabilidad estacional del nivel del mar está constituida por la tendencia, que es un proceso no estacionario (Bendat y Piersol, 1986), una componente periódica, representada por su ciclo anual medio (CAM), y una componente aleatoria representada por AVMM.

$$X_T = \frac{1}{30} \sum_{d=-19}^{d=19} F(d)H(T+d), d \neq 0$$

Filtro de doodson X0 (IOC, 2006)

### 1.3.7. La técnica del pronóstico perfecto.

La presencia de máximos en las funciones espectrales de la variabilidad mensual del nivel del mar, y la existencia de una estrecha relación lineal con otros factores, constituye la base de la simulación y pronóstico de las mismas. La idea de modificar el modelo de la regresión lineal con el objetivo de estimar o tomar en cuenta la estructura interna del proceso

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

estudiado, en este caso del nivel del mar, fue propuesta inicialmente en Hamon y Hannan (1963).

Si se considera un modelo del tipo

$$y(t) = a + \sum_{j=1}^N z_j(t)b_j + e(t)$$

Donde  $y(t)$  - proceso en la salida del sistema lineal,  $a$  - miembro independiente de esta ecuación,  $j$  - número de orden de los procesos en la entrada del sistema,  $N$  – número de procesos en la entrada del sistema,  $z_j(t)$  - procesos de entrada del sistema en función del tiempo,  $b_j$  - coeficiente angular de la ecuación,  $e(t)$  - proceso residual no observable en función del tiempo.

La ecuación anterior se cumple sólo para una parte del intervalo de frecuencias, ya que  $y(t)$  está formada por dos componentes.

Para un modelo de regresión espectral de dos entradas (Guerman y Levikov, 1988), se tiene que:

$$y(t) = a + b_{zy} z(t) + b_{vy} v(t)$$

El miembro independiente se halló mediante la fórmula:

$$a = \bar{y} - b_{zy} \bar{z} - b_{vy} \bar{v}$$

Dónde:  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\bar{v}$  - valor medio del proceso a pronosticar  $y(t)$  y de los procesos de entrada  $z(t)$  y  $v(t)$ .

Todos los cálculos se realizaron mediante programas elaborados en Digital Visual Fortran VII y los gráficos mediante el sistema EXCELL.

## Capítulo II. Resultados y discusión.

### 2.1. Caracterización de la variabilidad mensual y anual del nivel del mar, la circulación y el campo termo – halino del Mar Caribe y del Golfo de México.

En los trópicos una parte sustancial de la energía solar se utiliza en los procesos de evaporación y formación de la lluvia. Por ello no es notable la oscilación diaria de la temperatura en relación con los valores extremos de esta variable. La temperatura media en las regiones tropicales oscila alrededor de los 27.0° C, aunque sí se producen variaciones a través el año, pero ligeras. Por eso no se distinguen significativamente las estaciones por períodos cálidos y fríos, sino por períodos secos y lluviosos.



## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

En las escalas temporales correspondientes a variaciones con períodos mensuales y anuales, la variabilidad del nivel del mar, la circulación de las aguas y el campo termo – halino se encuentran estrechamente relacionados, condicionados por procesos astronómicos, oceánicos y atmosféricos, así como geofísicos e hidrológicos. La distribución espacio –temporal de esos tres grandes procesos oceánicos es desigual, debido a:

1. La desigual distribución de la radiación solar sobre la superficie de la Tierra, que posee una variabilidad diurna y estacional principalmente.
2. La desigual distribución de la densidad de las aguas oceánicas y consecuentemente de las corrientes marinas, que posee una variabilidad intra-estacional e interanual principalmente.
3. La interacción con la atmósfera y la mezcla convectiva y turbulenta con las aguas profundas, cuya variabilidad se manifiesta con períodos desde la escala sinóptica a la climática, principalmente.
4. Los procesos de fusión o formación de los hielos de los casquetes polares, glaciares, y de las regiones de hielos permanentes, producto de los cambios climáticos, que se han ocurrido en una sucesión a plazos de decenas de miles de años.
5. La configuración de la línea de costa y del relieve submarino, principalmente en las regiones oceánicas de los mares marginales o mediterráneos, en los cuales también ejerce mayor influencia el aporte de los grandes ríos.

La variabilidad del viento (Tabla 2.1) es uno de los procesos que mayor influencia ejerce sobre la variabilidad mensual y anual del nivel del mar, la circulación y el campo termo – halino del mar Caribe y del golfo de México.

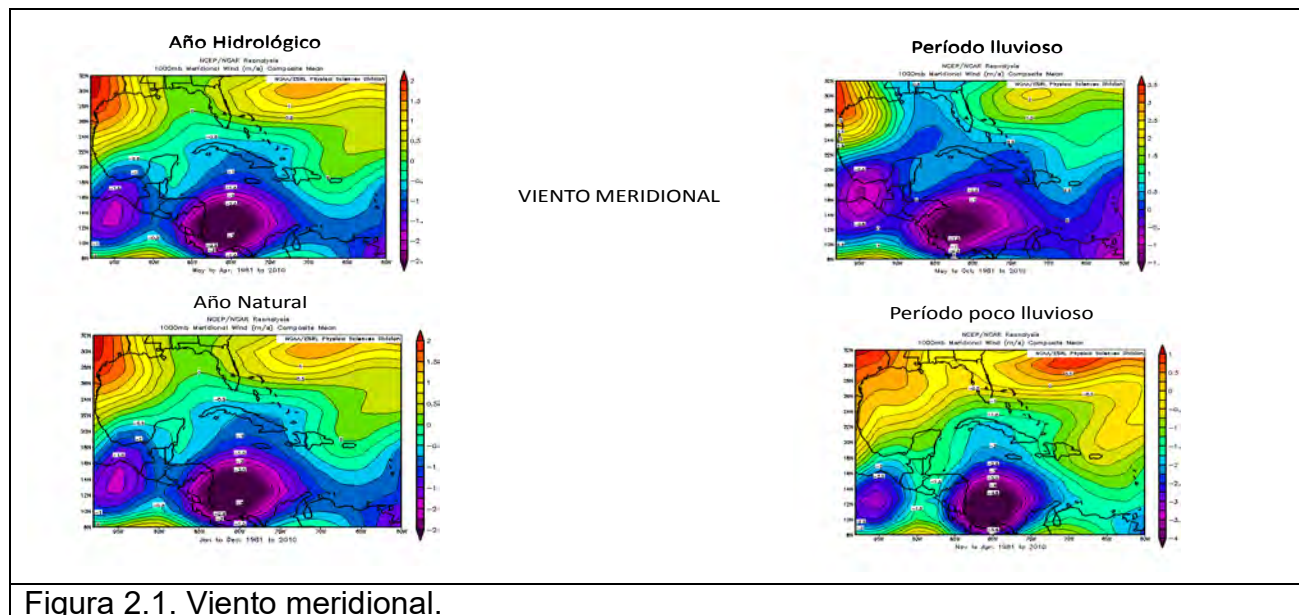


Figura 2.1. Viento meridional.



La Figura 2.1 muestra cómo se comporta el viento meridional, en las tres escalas de tiempo, con sus peculiaridades de la variable de estudio y su comportamiento en el entorno, con un máximo de intensidad, de componente sur, en el mar Caribe en su parte sur, en centro América. Hacia las regiones al norte de Cuba predomina la componente norte.

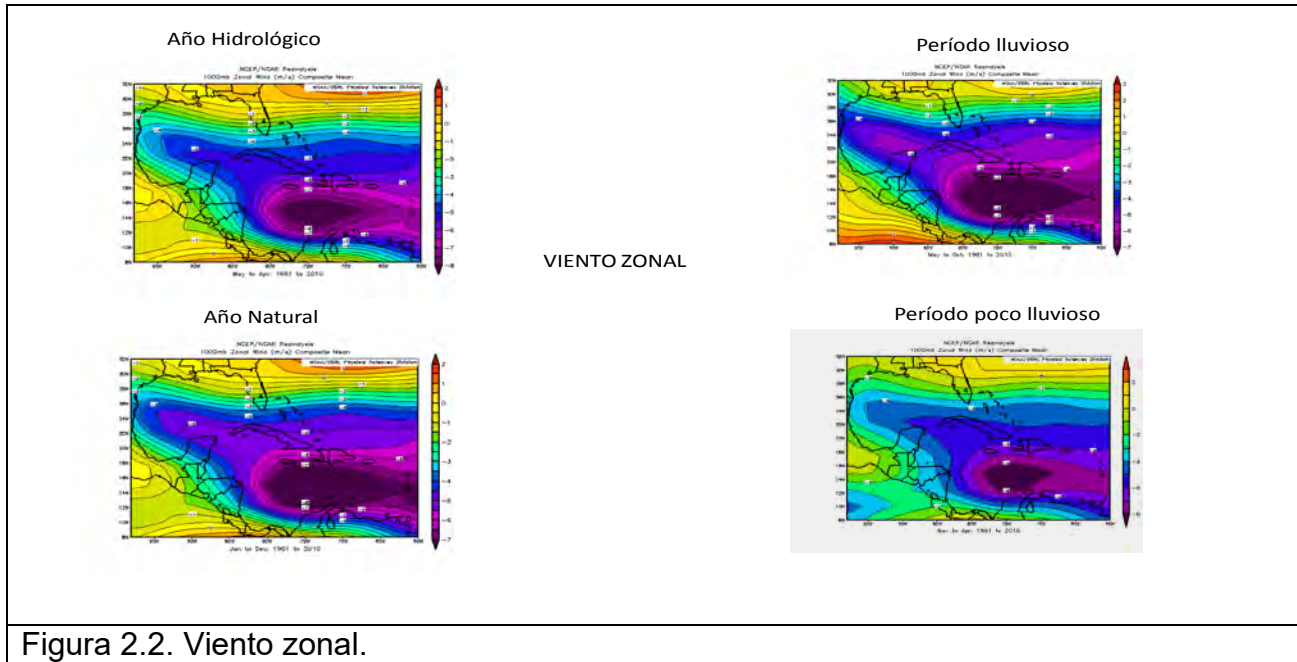


Figura 2.2. Viento zonal.

La Figura 2.2 muestra cómo se comporta el viento zonal, en las tres escalas de tiempo, con sus peculiaridades de la variable de estudio y su comportamiento en el entorno, con un máximo de intensidad, en el mar Caribe en su parte media, en su parte sur, en centro América.

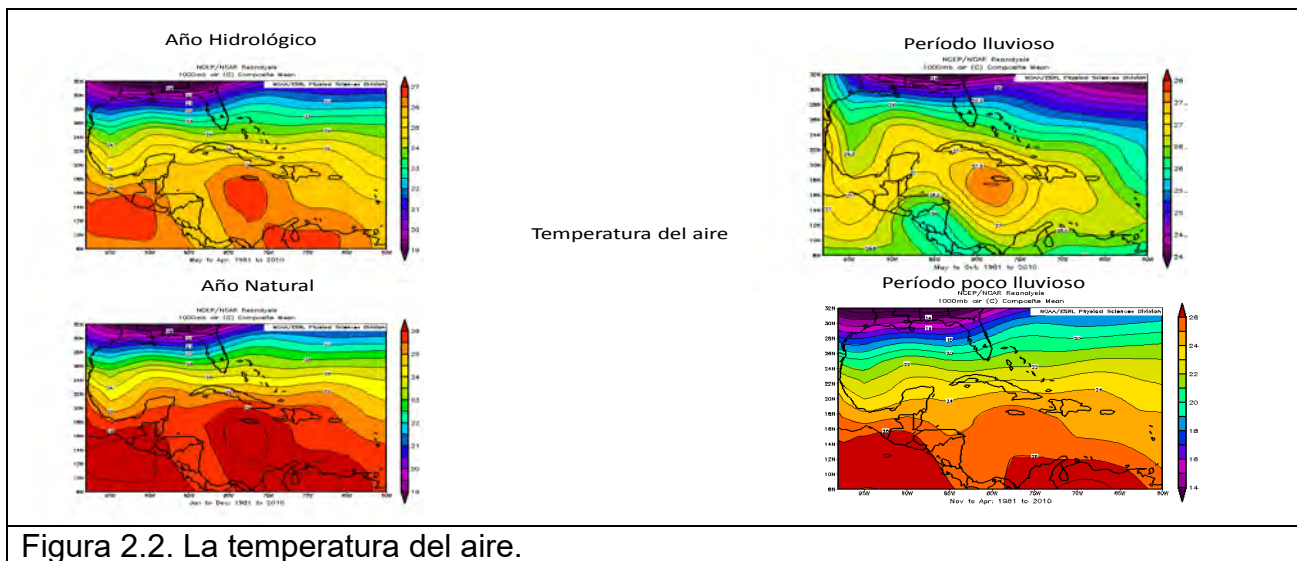


Figura 2.2. La temperatura del aire.

La Figura 2.2 muestra cómo se comporta la temperatura del aire, en las tres escalas de tiempo, con sus peculiaridades de la variable de estudio y su comportamiento en el entorno, con un máximo de intensidad, en el mar Caribe en las inmediaciones de Jamaica, en su parte sur, coincidiendo con las zonas de predominante componente sur del viento meridional.

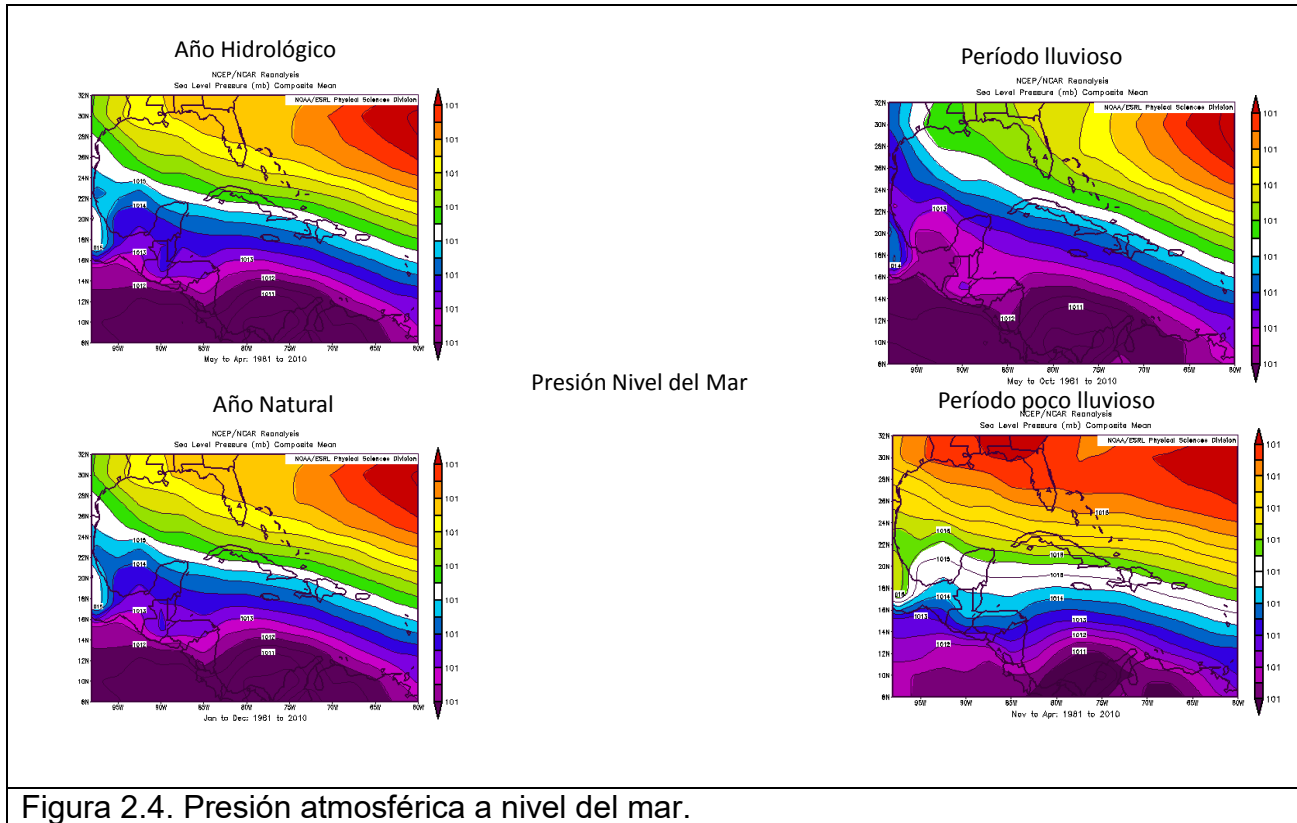


Figura 2.4. Presión atmosférica a nivel del mar.

La Figura 2.4 muestra cómo se comporta la presión nivel del mar, en las tres escalas de tiempo, con sus peculiaridades de la variable de estudio y su comportamiento más activo en su desplazamiento zonal sobre el mar Caribe y el área de los territorios de los archipiélagos caribeños de las Antillas Mayores.

Las series de valores mensuales y anuales de la temperatura del aire, las componentes meridional y zonal del viento y la presión atmosférica se muestran en los anexos 1, 2 y 3:

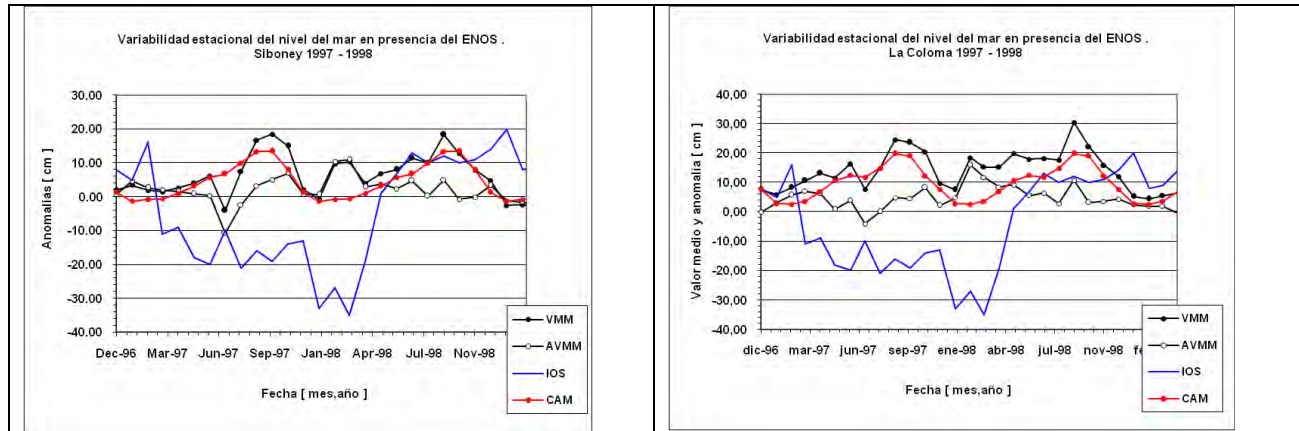
- Si comparamos las gráficas, vemos que la región 1 es muy parecida a la región 2, no así pasa con la región 3.
- Si partimos que la región 1 y 2 son parecidas es que hay en común de una que tiene la otra que es la influencia de los patrones atmosféricos de los anticiclones oceánicos en su elongación penetra en la Cuenca del Caribe y a su vez del Océano Pacífico,

## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

influye sobre el Golfo de México, con los Índices Atmosférico y el evento ENOS con la Oscilación del Sur.

- Recordando que la temperatura de la superficie del mar posee una significativa influencia sobre la circulación atmosférica y es reconocida como uno de los principales factores modificadores de los mismos. La TSM determina en gran medida la temperatura del aire y la distribución de la humedad en la capa superficial de los océanos tropicales, por lo que propicia cambios significativos en el campo de la presión y, en consecuencia, en la circulación atmosférica.
- Por último, se observa que la línea de tendencia en las gráficas en general tiende al aumento, en la serie de estudio, donde hay una gran variación de la temperatura. La comprensión de dichas variaciones puede contribuir sustancialmente a la estimación del calentamiento global, por la intensificación del efecto invernadero debido a causa humana.
- Las anomalías son las más controversiales y en todas las gráficas se observó una tendencia a crecer y de forma positiva que se interpreta como más cálidas que lo normal.

### 2.1.1. Variabilidad mensual y anual del nivel del mar en el mar Caribe y el golfo de México.



## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

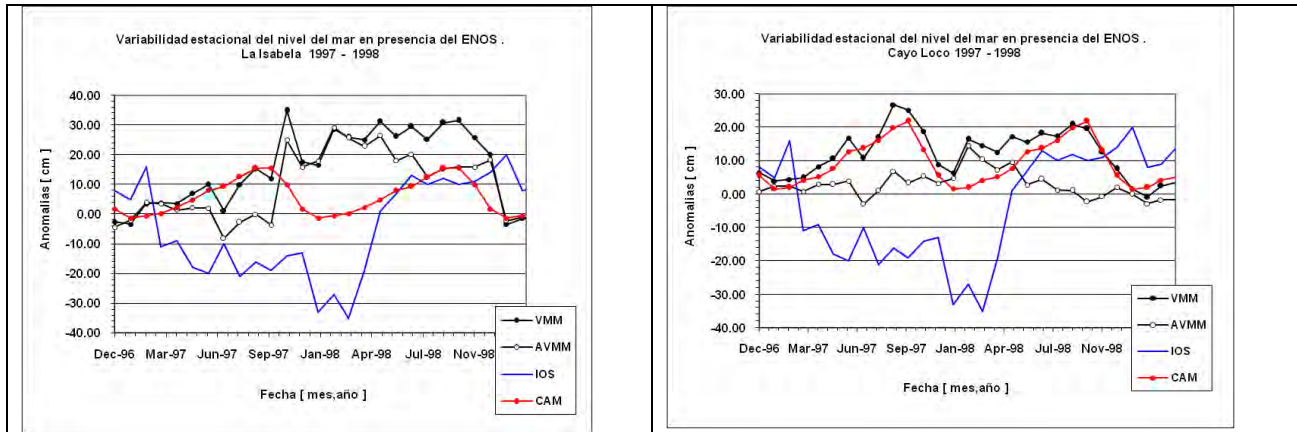


Figura 2.5. Anomalías mensuales durante los eventos ENOS en Cuba.

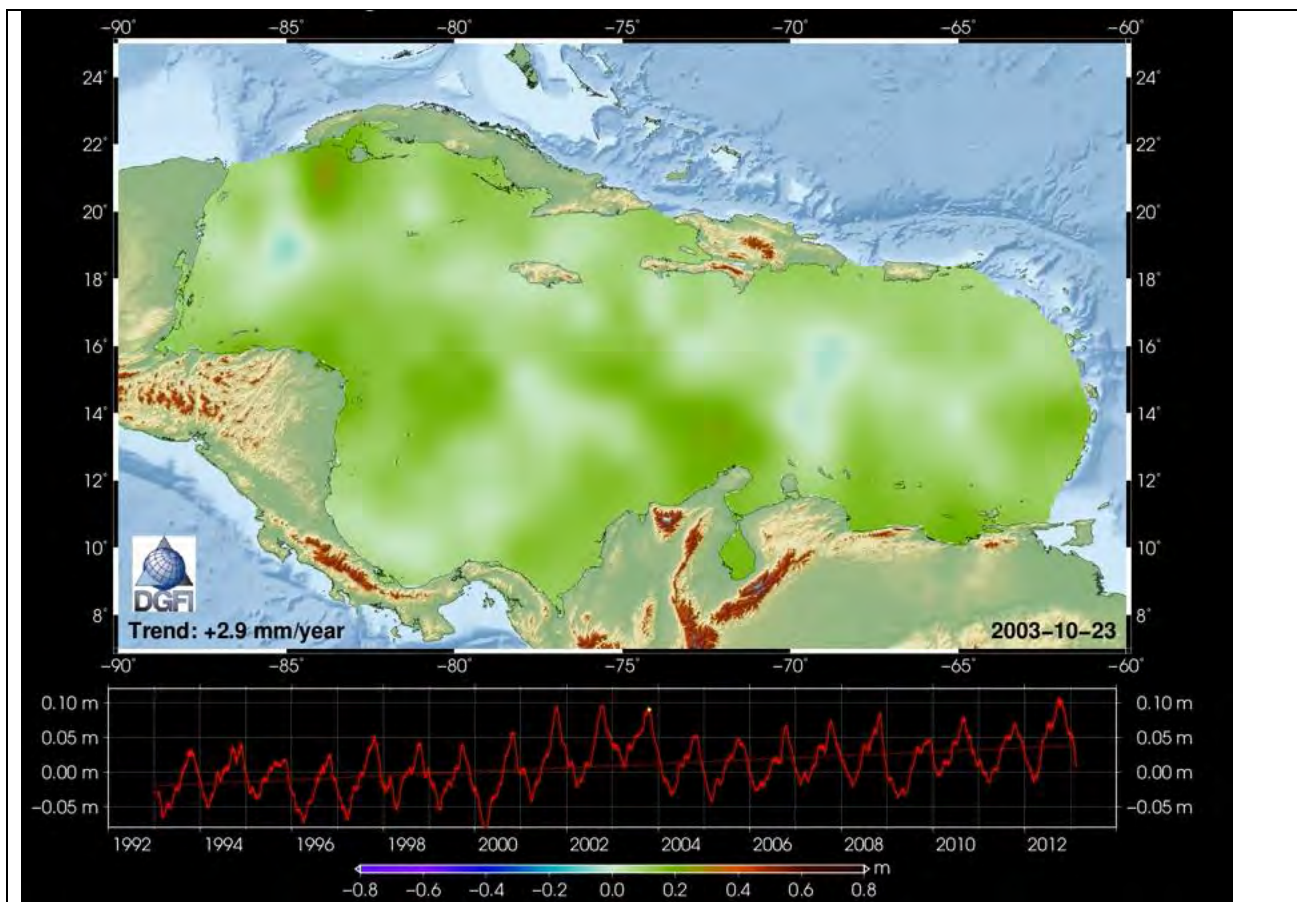


Figura 2.6. El nivel medio regional mostró valores de alturas importantes durante años ENOS, por las anomalías producidas.

Los resultados de los cálculos de las anomalías mensuales para diferentes zonas del mar Caribe y el golfo de México, se muestran en el anexo 3. Como se puede observar la mayor parte de las anomalías alcanzan valores de 20 a 40 cm.

### 2.1.2. Circulación del mar Caribe y del golfo de México.



## Programa “Cambio climático en Cuba: impactos, mitigación y adaptación”

La penetración de las aguas atlánticas a través de los pasos del arco de las Antillas Menores y la sinuosa y compleja trayectoria a través del Mediterráneo Americano, en intensa interacción con la atmósfera, se refleja en la ocurrencia de grandes giros y lazos, estables por su ubicación espacio – temporal, y otros de menor estabilidad, tamaño y período de existencia. El flujo principal de la circulación, presenta una variabilidad estacional (Sukhovey, 1986) lo cual contribuye a su vez a la ocurrencia de fluctuaciones estacionales del nivel medio.

La estacionalidad y las anomalías intra – estacionales de los vientos, como en todas las cuencas marinas y oceánicas, también ocasionan variaciones periódicas y aperiódicas del nivel medio mensual y anual, reportadas en otras regiones (Sweet y Gill, 2009), pero la influencia de las mismas sobre las anomalías del nivel medio del mar no han sido documentadas en Cuba.

El campo termo – halino, cuyas fluctuaciones determinan las variaciones estéricas del nivel del mar, muestra en superficie en aguas cubanas, un mínimo estacional en febrero y el máximo en septiembre, con marcadas variaciones estacionales. Estas fluctuaciones estacionales, presentan un patrón o un promedio a escala regional, aunque en magnitud y momentos diferentes del ciclo anual medio (Sukhovey, 1986). Sin embargo, la influencia de los eventos de la variabilidad del clima sobre las aguas oceánicas, como un complejo de intercambio de humedad, calor y sal, dan lugar a anomalías estéricas del nivel medio registrado por los mareógrafos en las zonas costeras.

Algunos autores destacan la importancia, que por su influencia sobre las características hidrológicas de las aguas oceánicas, ejercen las grandes corrientes fluviales de mayor cercanía geográfica al Mediterráneo Americano, desde el Amazonas hasta el Mississippi (Mitrani y Díaz, 2008 c; Vichot y Mitrani, 2011).

La corriente del Caribe se orienta de Este a Oeste (Figura 2.7). Por el Sur de Jamaica gira hacia el Noroeste hasta alcanzar el Estrecho de Yucatán, con una velocidad media de un nudo\* (0,5 m/s), mientras que otra rama atraviesa el Paso de Los Vientos para unirse con la corriente de Las Antillas. Ya en el Estrecho de Yucatán, puede alcanzar una velocidad de hasta tres nudos en su eje, a unas 33 millas de las costas de Yucatán. Desemboca en el Golfo de México, donde disminuye su velocidad hasta un nudo y se divide en tres ramas. La principal se dirige hacia el Noreste para unirse con la corriente de la Florida, una va hacia el Noroeste y es más fuerte en verano al contar a su favor los vientos del Sudeste y otra hacia el Oeste, sobre el Banco de Campeche. Dentro del Golfo de México se establece una circulación anticiclónica; el grueso de las aguas desemboca en el Estrecho de La Florida.

La mayor parte del transporte de masa y calor se verifica en las aguas adyacentes a Cuba (Figura 2.8).

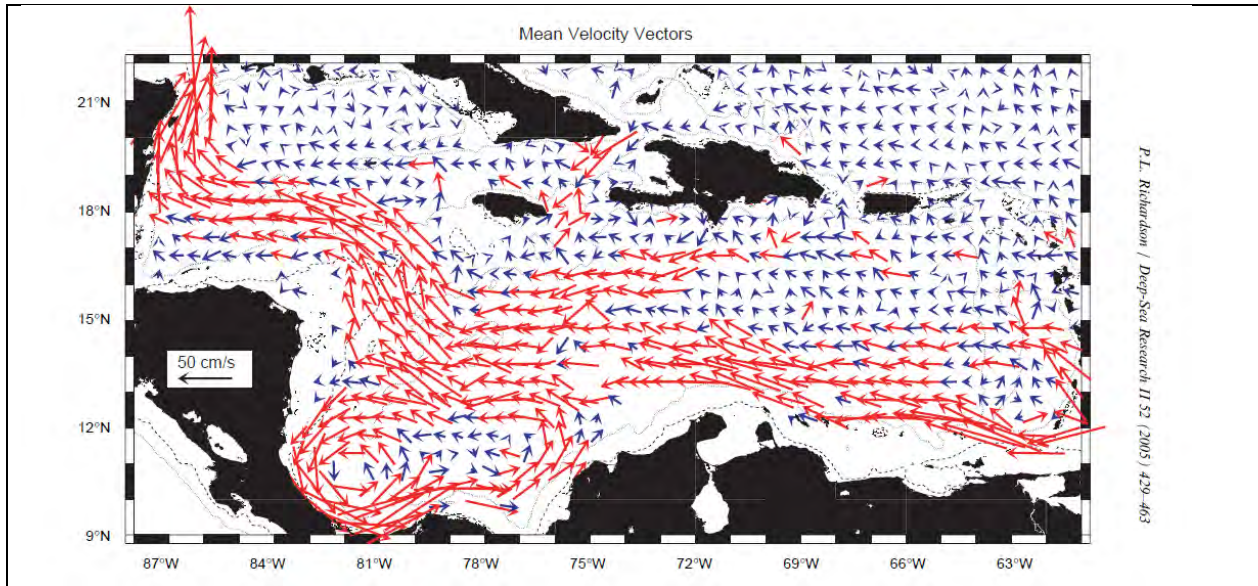


Figura 2.7. Vectores de la velocidad media (Richardson, 2005).

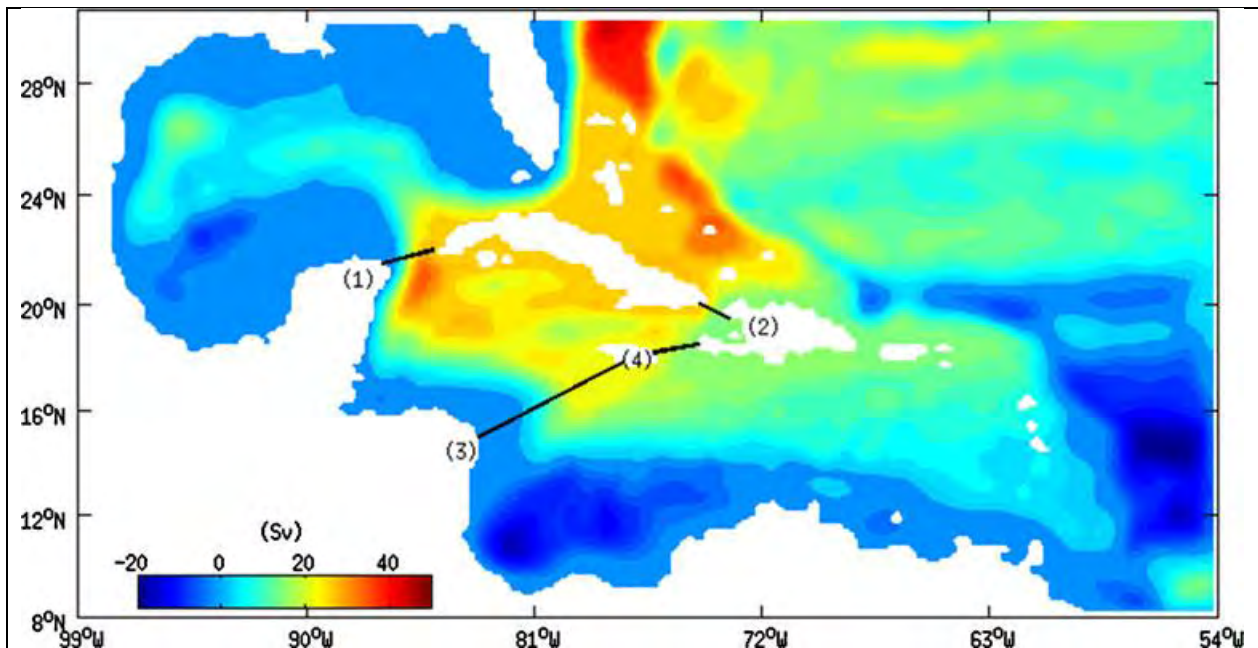


Figura 2.8. Función del tiempo del volumen medio de transporte de la corriente (1 Sv=106 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) en el Mediterráneo Americano calculado a partir de resultados de la modelación (Exp-CR) durante cinco años, desde el 1 de enero de 2000 hasta el 31 de diciembre de 2004. La líneas 1 – 4, indican las secciones para el transporte de volumen integrado de < YC < WP < NJ and < JH) (Yuehua Lin, *et al.*, 2011).

Durante el desarrollo del programa subtropical de estudios climáticos (Kevin D. Leaman, *et al.*, 1987), se realizaron secciones transversales verticales en el estrecho de La Florida, en los 27° de LN, entre abril de 1982 y julio de 1984, destacándose un flujo relativamente fuerte hacia el Oeste, cerca de las Bahamas, con velocidades cerca de los 180 cm/s.